

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»

ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

(наименование института полностью)

Кафедра «\_\_\_\_\_ Промышленная электроника \_\_\_\_\_»

(наименование кафедры)

27.03.04 Управление в технических системах

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Системы и технические средства автоматизации и управления

(направленность (профиль)/специализация)

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

на тему Автоматизированная система вибродиагностики  
нефтеперерабатывающей установки

Студент

А.В. Билан

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

Д.Г. Токарев

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Консультант

О.А. Парфенова

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

**Допустить к защите**

Заведующий кафедрой к.т.н., доцент, А.А. Шевцов

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(личная подпись)

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Тольятти 2019

## АННОТАЦИЯ

Тема выпускной работы «Автоматизированная система вибродиагностики нефтеперерабатывающей установки». Бакалаврская работа по направлению подготовки бакалавра 27.03.04 «Управление в технических системах»: - Тольятти, ТГУ, 2019.

Данная бакалаврская работа состоит из пояснительной записки на 49 листов, 23 иллюстрации, 2 таблиц, 25 источников литературы и 6 листов графической части формата А1.

Работа включает в себя введение, цель и задачи, 4 главы, вывод и список использованной литературы.

Первая глава дает представление о внедряемой системе диагностического контроля, в ней описывается принцип действия системы вибродиагностики, ожидаемые результаты от ее внедрения и возлагаемые на неё задачи. Описывается выбранная установка нефтеперерабатывающего завода для построения на ее базе вибродиагностической системы.

Вторая глава описывает разбиение диагностической системы на узлы, которые можно отнести к полевым узлам и программным модулям диагностической станции. В данной главе описывается: назначение полевых узлов, а также обязательные критерии размещения этих узлов для обеспечения их корректной работы; программное обеспечение системы диагностической станции, описания их взаимодействия и назначения.

Третья глава описывает функционирование модуля экспертной системы диагностической станции, путем использования алгоритмов нечетких логических выводов и представляющую собой искусственную нейронную сеть. Приводится пример базы знаний и на ее основе создание алгоритма обучения нейронной сети.

В четвертой главе, используя методику определения допустимых значений вибрации, рассчитаны собственные критерии оценки технического состояния для диагностируемого парка машин.

## **ABSTRACT**

The title of the graduation work is Automatic Vibro-Diagnostic System of Oil Refining Station. This work consists of 49 pages, 2 tables, 19 pictures, 23 source references and an application with 6 A1 drawings.

The current work includes the introduction, the main objective and tasks, 4 chapters, the conclusion and the list of source references.

The first chapter represents the implemented diagnostic control system; it describes the main working principles of the vibro-diagnostic process, its estimated results of the implementation and reimbursed objectives. Also this chapter shows the selected oil refining plant being set up on the base of our vibro-diagnostic system.

The second chapter describes the splitting process of the diagnostic system into nodes, which can be referred to the field nodes and programmed modules of diagnostic stations. The chapter considers the main purpose of using field nodes and the necessary criteria of placing and planning those nodes for their better working; the software of the diagnostic system, the description of their interactions and assignments.

The third chapter shows the functioning process of the expert system module of the diagnostic system, which represents artificial network using fuzzy inference algorithms. The knowledge base and the creation process of the artificial network-learning algorithm are considered as an example.

In the fourth chapter, using methods of defining the allowed vibration values, the criteria for evaluation technical conditions of the diagnosed car park is calculated.

## Содержание

Введение.....	6
1 Анализ выбранной установки для внедрения системы вибродиагностики...8	
2 Описание системы вибродиагностики.....	10
2.1 Проведение измерений вибраций.....	11
2.2 Задачи системы вибродиагностики.....	13
2.3 Разбиение диагностируемого агрегата на элементарные узлы.....	14
3 Состав системы вибродиагностики.....	15
3.1 Вибродатчики и их монтаж на агрегат.....	16
3.2 Программируемый интерфейсный модуль.....	19
3.3 Диагностическая станция .....	21
3.3.1 Программное обеспечение системы вибродиагностического контроля.....	23
3.3.2 Работа экспертной системы на основе нейронной сети.....	30
3.3.3 Создание обучающей выборки.....	34
4 Методика нормирования вибрации и распознавания технического состояния оборудования.....	43
Заключение.....	46

## **Введение**

Технологии современного мира развиваются с каждым днем и становятся все сложнее. С повышением сложности технологических систем возникает необходимость в постоянном контроле и технической поддержке данных объектов. В данной выпускной квалификационной работе будет рассмотрен один из способов проведения технической диагностики механической системы.

Будучи молодой наукой техническая диагностика возникла не более полвека назад, удовлетворяя потребности современных технических разработок. Говоря более общим языком, данная наука представляет собой методологию распознавания состояний исследуемой технической системы, которая может содержать в себе огромный список проблем, связанных с доступностью получения информации диагностики в процессе эксплуатации данной системы.

Исходя из сложности и дороговизны технических систем, которые могут быть использованы в таких областях науки как машиностроение и радиоэлектроника, могут требовать повышенную диагностическую внимательность к своей долговечной работоспособности.

Изучая методы распознавания неполадок и математических теорий диагностических методов, имеется возможность обоснованного выбора определенных способов диагностики, которые подошли бы к нашей ситуации.

Рассматривая теорию диагностики на первый взгляд выделяется неизбежный процесс математизации инженерных знаний, которые ставят новые особые требования к подготовке инженеров, однако следует всегда помнить, что цель расчета не число, а понимание.

Первым делом метод диагностики определяет диагноз – состояние системы, и, исходя из определенных показателей, делается окончательный вывод о работоспособности данной системы, а главной целью данной науки является повышение надежности и ресурса технических систем. Благодаря данным знаниям возможно ранее обнаружение неисправностей системы, что может предотвратить не желаемые последствия, а также повысить эффективность и надежности ее функционирования.

### **Цель выпускной работы**

Внедрение системы вибродиагностического контроля на установку каталитического риформинга ЛГ-35/11-300 Сызранского нефтеперерабатывающего завода.

### **Задачи выпускной работы**

1. Произвести анализ выбранной установки нефтеперерабатывающего завода;
2. Описать принцип проведения диагностики по параметрам вибрации роторных электродвигателей;
3. Разработка необходимой структуры системы, для проведения диагностики промышленного оборудования;

4. Описать строение программного обеспечения диагностической станции;
5. Описание работы модуля экспертной системы, основанной на применении искусственной нейросети и написание алгоритма обучения данной сети;
6. Используя методику определения допустимых значений вибрации, разработать собственные критерии оценки технического состояния для диагностируемого парка машин.

## **1 Анализ выбранной установки для внедрения системы вибродиагностики**

За основу бакалаврского проекта была взята установка каталитического риформинга ЛГ-35/11-300 которая эксплуатируется на территории Сызранского нефтеперерабатывающего завода, установка ЛГ-35/11-300 предназначена для переработки широких бензиновых фракций с целью получения высокооктанового бензина.

Схема установки каталитического риформинга ЛГ-35-11/300 с расположением роторных электродвигателей, периферийных модулей и имеющихся магистральных кабельных линий представлена на чертеже №1.

Установки ЛГ-35/11-300 является типовой, разработана институтом Лепгипрогаз и проектным бюро предприятия завода тяжелого машиностроения в городе Магдебург (ГДР). Технологическое оборудование поставлялось из ГДР.

Каталитический риформинг использующийся на установке – это химический процесс, представляющий из себя различные преобразования

углеводородов. В ходе реакции, протекающей на катализаторах риформинга, при максимальной температуре до 530 °С, происходят глубокие изменения углеводородного сырья. Мощность установки составляет 300 тыс. т в год по сырью.

Диагностируемое оборудование, на установке ЛГ-35/11-300, представляет из себя роторные электродвигатели Н-803, которые являются критическими узлами установки, чей внеплановый отказ или авария сопровождаются значительным снижением выпуска продукции. Эти агрегаты являются приоритетными узлами для внедрения системы компьютерного мониторинга, которая позволит отслеживать техническое состояние агрегатов и не допустить возникновения аварийной ситуации на установке.

## **2 Описание системы вибродиагностики**

Внедрение стационарной системы вибродиагностики на исследуемую установку обеспечит экологически безопасную, ресурсосберегающую работу оборудования, недопущение аварийной ситуации на производстве и локального сбоя в системе производственного процесса, путем мониторинга в реальном времени изменения технического состояния оборудования по данным вибрации на базе ЭВМ.

Результат работы автоматической вибродиагностической системы заключаются в:

1. прогнозирование изменения состояния исследуемого оборудования на основе поступающей диагностической информации.
2. в случае необходимости, последующим формированием задач на проведение необходимых действий в ближайшее время, обслуживающим персоналом.
3. отправкой сформированных задач в операторную и руководителям производства посредством предусмотренных каналов связи.

Процесс вибродиагностики производится путем выявления наиболее возможных зарождающихся неисправностей в узлах агрегата с помощью сопоставления поступающей диагностической информации и выработанной

системе допущения и классификации значений вибрации. Процесс сбора диагностической информации происходит непрерывно, с небольшим промежутком времени, позволяющим считывать результаты состояния диагностируемого агрегата без существенных изменений. Что дает возможность своевременной реакции на изменение диагностических признаков агрегата для недопущения аварийной ситуации или остановки рабочего процесса.

Прогнозируемые результаты внедрения системы компьютерной диагностики на установку каталитического риформинга ЛГ-35-11/300:

1. Мониторинг техсостояния диагностируемых агрегатов
2. Понижения возможности аварийных ситуаций, простоя агрегатов и технических отказов в оборудовании диагностируемой установки.
3. исключит возможность некачественного ремонта диагностируемого оборудования.
4. обеспечит возможность обслуживания агрегатов по их текущему техническому состоянию и уход от системы планово-предупредительного ремонта, что скажется на понижении затрат на эксплуатацию оборудования.
5. Понижение расхода комплектующих частей.
6. Повышение работоспособности обслуживающего персонала установки, а также повышение контроля со стороны руководителей предприятия за работой подчинённых.
7. Ускорения сроков ввода в эксплуатацию агрегатов, остановленных на ремонт, тем самым уменьшив простой оборудования.

## **2.1 Проведение измерений вибраций**

В процессе диагностики, при анализе полученного вибросигнала снятой с узла агрегата, за основу взята идея, что изменение этого сигнала указывающие на неисправность узла, появится до аварийного прекращения работы диагностируемого агрегата.

В диагностируемом агрегате упор при анализе полученного вибросигнала делается на повышении, того компонента вибросигнала, в котором четко прослеживается его изменение. Так как в большинстве случаев помехи будут заглушать компонент сигнала, указывающий на изменение состояния оборудования. Однако при невозможности выделения приемлемой системы нужных компонентов сигнала для обеспечения прогнозирования всех зарождающихся дефектов, указывающего на изменения состояния исследуемого узла, прибегают к методу анализа не одного конкретного дефекта, а допущения развития цепи дефектов, развитие которых попадет под разработанную систему выбранных компонентов сигнала. При этом упадет результативность прогноза состояния оборудования.

Особую сложность представляет подсистема диагностирования возникающих дефектов в роторном оборудовании и прогноз его техсостояния. Элементы роторного агрегата имеют вибрационные перемещения, связанные с циклической работой при эксплуатации машины, что создает существенные помехи при анализе сигнала.

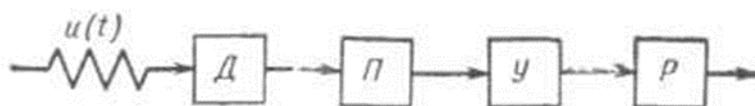


Рисунок 1 — Схема получения сигнала Д — датчик; П — преобразователь;  
У — усилитель; Р — регистратор

Датчик выполняет работу по преобразованию механических сигналов в электрический ток.

Преобразователь выполняет первичную фильтрацию сигнала (выделения полезного вибросигнала из всего спектра полученных данных).

Усилитель обеспечивает усиление нужного вибросигнала на фоне помех.

Регистратор записывает полученных сигнал на магнитную ленту.

После чего сигнал отправляется на ЭВМ для последующей обработки и анализа.

## **2.2 Задачи системы вибродиагностики**

Задачи возлагаемые на метод диагностики техсостояния динамического оборудования, основанного на анализе снятого виброакустического сигнала с узла агрегата можно выразить как:

1. Анализ состояния диагностируемого оборудования.
2. Обнаружение факторов порождающие дефекты, которые требуется ликвидировать.

Решаются эти задачи путем:

1. Выявление критических значений колебаний в ходе
  - проведении индивидуальных исследований диагностируемого агрегата
  - применения математических алгоритмов вычисления виброколебаний.
  - применения накопленного опыта и накопленных данных.
2. При выявлении критических значений колебаний для диагностируемых машин проводят анализ состояния всех исследуемых

агрегатов. На основе этих результатов производится коррекция допустимых значений на выбранных парк агрегатов и последующая коррекция оценки технического состояния оборудования.

Характеристиками, указывающие на техсостояние исследуемого агрегата, являются:

1. напряжение в сопряженных узлах агрегата
2. вибрация в узлах агрегата
3. брак при сборке агрегата или брак при изготовлении отдельного узла агрегата, приведший к нарушению его геометрических пропорций.
4. параметры физических и механических процессов, происходящих при работе оборудовании.

Выбор оптимальных критерий используемых значений для диагностики конкретного парка машин, способных обеспечить качественный анализ состояния оборудования, может обеспечить только индивидуальные исследования этого парка машин.

### **2.3 Разбиение диагностируемого агрегата на элементарные узлы**

Учитывая сложное устройство агрегата, представляющего из себя систему зависимых друг от друга узлов, где прекращение работы одного узла будет означать некорректную работу целого агрегата или прекращение его работы, а также сложность диагностирования всей системы в целом из-за зависимости диагностических характеристик одного узла, от диагностических характеристик остальных узлов в системе агрегата, диагностируемая система разбивается на части, с помощью чего упрощается

процесс выискивания неисправностей приводящих к некорректной работе агрегата.

При анализе общего состояния агрегата, вывод о его состоянии можно сделать по общим диагностическим признакам агрегата или диагностическим признаком отдельных его узлов. Первоочередной проверки работоспособности подвергаются так называемые критические узлы, это те узлы системы, вероятность отказа в работе которых наиболее высока, в связи с их меньшим ресурсом работы или узлы, прекращение работы которых несет за собой наиболее отрицательный экономический эффект или требует наибольших трудовых затрат на восстановление работоспособности узла.

### **3 Состав системы вибродиагностики**

Архитектуру системы вибродиагностики реализуемой на основе установки ЛГ-35-11/300 можно поделить на подсистемы:

- сеть датчиков снимающие параметры с диагностируемых агрегатов установки.

- сеть выносных модулей, выполняющих работу первичного преобразования поступающих с датчиков сигналов и последующую передачу их в следующее звено системы, диагностическую станцию, а также выполнение анализа работоспособности датчиков и анализа целостности сигнальных линий.

- Кабельные линии связи, слушающие для связи подсистем в единую архитектурную сеть и реализуемых на основе существующих кабельных каналов установки.

- Диагностическая станция системы, выполняющую функцию сбора, полученной информации её хранение, анализ, с последующим выводом полученных результатов.

- Диагностическая сеть, выполняющая функцию предоставления полученной информации о состоянии диагностируемых узлов установки в реальном времени на компьютерах обслуживающего персонала и руководителей.

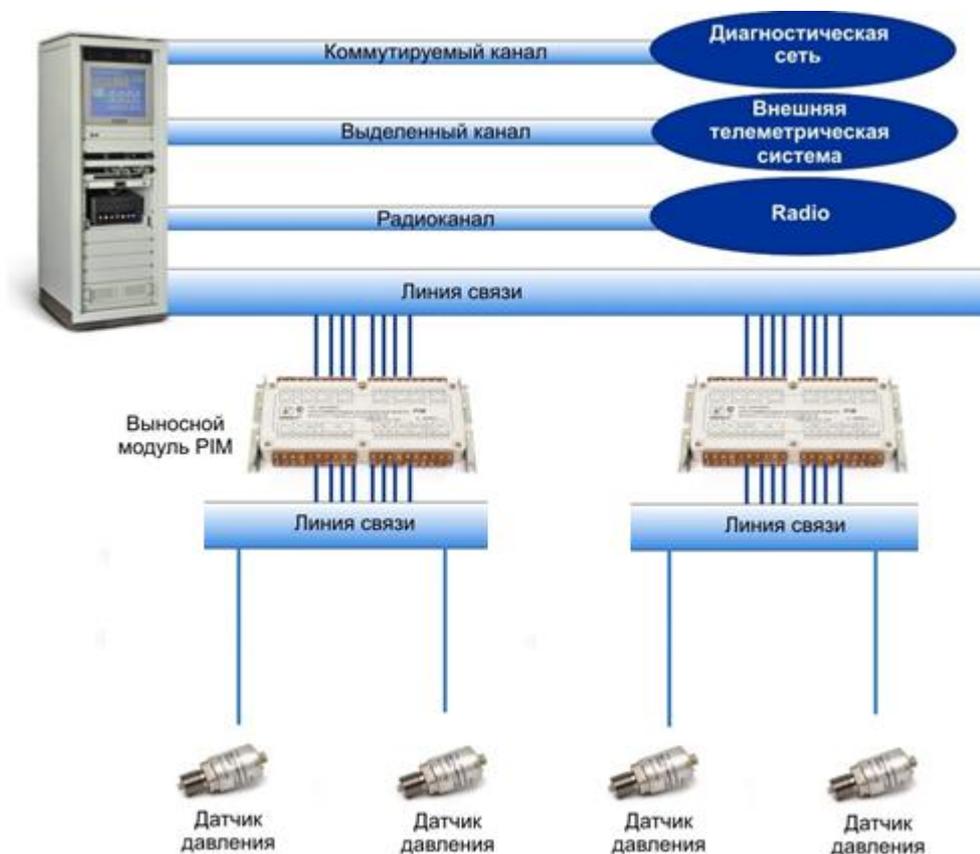


Рисунок 2 — Структурная схема системы

### 3.1 Вибродатчики и их монтаж на агрегат

При размещении вибродатчика на корпусе диагностируемого агрегата, датчик следует размещать как можно ближе к исследуемому узлу агрегата, на твердой поверхности пригодной для его монтажа, так что бы на рабочую поверхность датчика воздействовала вибрация диагностируемого узла.

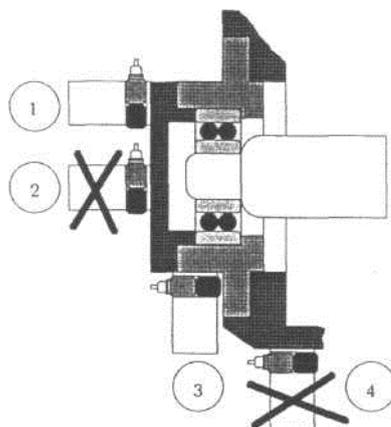


Рисунок 3 — Иллюстрация выбора крепления датчика

Расположение датчика под номером 1, по сравнению с датчиком номер 2, является единственно верным из двух вариантов, так как датчик под номером 2 не обеспечивает снятия корректного виброакустического сигнала из-за его крепления на тонкой стенке, что искажает сигнал и не допустимо при монтаже вибродатчика. Место установки датчика номер 3, по сравнению с датчиком номер 4, является более целесообразным, так как при диагностировании узла агрегата, на полученный вибрационный сигнал с датчика номер 4, будет оказываться большее влияние другого узла агрегата, что дает более искажённый сигнал, в сравнении со снятым сигналом с датчика 3. Число элементов между датчиком и диагностируемым узлом нужно минимизировать, что обеспечит минимальное искажение снимаемого сигнала.

Измерительная ось по возможности должна быть направлена по оси действия силы возбуждаемой исследуемым узлом, то есть рабочую зону датчика при монтаже необходимо размещать перпендикулярно оси действия силы.

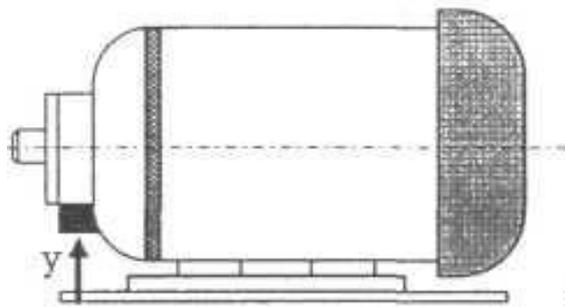


Рисунок 4 — Размещение вибродатчика перпендикулярно оси действия силы

Для снятия вибросигнала, в составе внедряемой системе вибродиагностики, на диагностируемый электродвигатель Н-803 монтируются пьезоэлектрические вибропреобразователи, выполняющие преобразование механических колебаний в электрических ток (пьезодатчики), по одному на крышку подшипника и подшипниковый щит (чертеж номер 2), малые физические габариты пьезодатчиков упрощают выбор мест их монтажа.



Рисунок 6 — пьезодатчик

Выбор места монтажа датчика обусловлен снятием вибросигнала по поперечному направлению агрегата, так как оно является направлением минимальной жесткости агрегата.

Пригодность электродвигателя Н-803 к диагностике обеспечивается предусмотренной возможностью монтажа датчика системы вибродиагностики на подшипниковый щит, а также дополнительной

возможностью монтажа площадки под датчик на крышку подшипника с помощью крепежного элемента типа болт.



Рисунок 7 — Пример монтажа площадки для установки датчика

### **3.2 Программируемый интерфейсный модуль**

Программируемый интерфейсный модуль является промежуточным устройством в архитектуре сети системы вибродиагностики, между считывающими информацию устройствами (датчиками) и устройством обрабатывающим полученную информацию (диагностической станции).

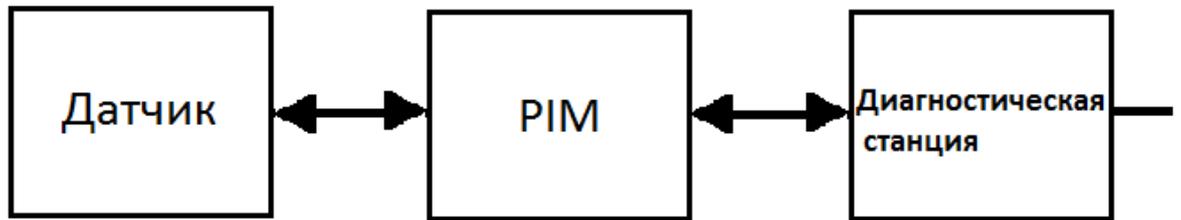


Рисунок 8 — схема подключения программного интерфейсного модуля

Модуль РИМ выполняет функции:

1. Фильтрация и усиления поступающих сигналов с датчиков вибрации
2. Преобразовании в выходной ток полученных сигналов
3. Преобразование информации в цифровую форму
4. Передача цифровой информации в диагностическую станцию посредством отправки её по сигнальной линии.

Осуществление выполнения функций модуля может осуществляться по двумя методами:

В первом способе работа контроллера осуществляется посредством управления им через диагностическую станцию, когда от нее поступает требуемая команда на проведение измерений и с получением команды модуль начинает осуществлять её выполнение.

Во втором способе модуль заранее программируется через диагностическую станцию на автоматическую работу, выполняемой посредством проведения измерений с ранее определенными промежутками времени.

Монтаж программируемого интерфейсного модуля должен осуществляться в непосредственной близости от диагностируемого узла агрегата, пример расположения модуля показан на чертеже №2.

В целях защиты программируемого интерфейсного модуля от физических воздействий, его монтаж осуществляется в защитных металлических коробках.



Рисунок 9 — Размещение программного интерфейсного модуля в защитной коробке

Связь модуля с диагностической станцией происходит посредством подключения двух каналов связи, один используется в качестве источника питания модуля и выполняет функции управление модулем, а второй используется для передачи полученной диагностической информации, представляющей из себя цифровой сигнал.

### **3.3 Диагностическая станция**

Диагностическая станция является ключевым элементом в архитектуре сети системы вибродиагностики. Задача диагностической станции

заключается в выполнении сбора, хранения и анализе полученных данных с последующим выводом полученных результатов мониторинга.



Рисунок 10 — Диагностическая станция

Диагностическая станция имеет модульную конструкцию из пульта управления, клавиатуры, монитора, источника бесперебойного питания, принтера, маршрутизатора, вентиляторной панели и диагностических контроллеров. Выбор и количество диагностических контроллеров зависит от специфики поставленных задач перед диагностической станцией. Располагается станция в операторные установки.



### **3.3.1 Программное обеспечение системы вибродиагностического контроля**

Программное обеспечение диагностической станции создано по модульной конструкции, основной этой конструкции служит центральный модуль операционной системы, представляющее из себя ядро, которое выполняет функции согласующего звена операционной системы.

Использование ядра в построении операционной системы позволяет реализовать функции:

- принципа многозадачности, которая обеспечивающий возможность параллельной работы нескольких модулей, а также обеспечивающей связь между задействованными модулями, путем управления обменом информацией между ними.
- защиты системы от преднамеренного, противоправного овладение конфиденциальной информацией лицом, не имеющим права доступа к охраняемым сведениям.
- поддержки источника бесперебойного питания.



Рисунок 12 — Структура ПО ЭС

Основные модули по:

1. Модуль менеджера каналов проводит измерения данных полученных от программных интерфейсных модулей, формирование и передачу информации исполняющим модулям.
2. Вычислитель диагностических признаков осуществляющий обработку поступающего сигнала, дальнейшее вычисления главных снимаемых параметров агрегата и скорость их изменения. Анализ технического состояния, диагностируемого парка агрегатов с определением наиболее нестабильных узлов системы требующих повышенного внимания.
3. Экспертная система, на основе полученных данных используя алгоритм неточных логических данных (нейросеть) выдает предписание персоналу на проведения требуемых действий, обеспечивающих дальнейшее стабильное функционирование системы. При необходимости останавливает работу агрегата, находящегося в предаварийном или аварийном состоянии, путем выдачи предписаний оператору установки.



Рисунок 13 — Структура работы ЭС

4. База данных используется системой для хранения всей поступающей диагностической информации.
5. Вывод речевых оповещений используется для формирования оповещения обслуживающему персоналу установки, отображающий необходимую в данный момент информацию, а также циклического воспроизведения данного оповещения с выбранным промежутком времени, до остановки операции воспроизведения оператором установки.
6. Интерфейс диагностической сети предприятия отображает состояние работы всего диагностируемого парка машин для оператора в данный момент времени путем получения информации с сервера базы данных системы.
7. Терминальный интерфейс выполняет функции доведение информации обслуживающему персоналу (электрики, механики) о состоянии конкретных диагностируемых агрегатов, требующих вмешательства.
8. Модуль Web-сервиса дает возможность получения удаленного доступа к системе компьютерной диагностики через интернет используя только браузер.

9. Модуль “Монитор” обеспечивает классификацию диагностируемого парка машин по состоянию оборудования и последующее отображение полученной информации путем отнесения отдельно взятого агрегата к группам:

- нормального технического состояния оборудования (отображается зеленым цветом)
- неудовлетворительного технического состояния оборудования, требующего принятия мер по его ремонту (отображается желтым цветом)
- группа оборудования недопустимых к эксплуатации из-за аварийного технического состояния этого оборудования (отображаются красным цветом).



Рисунок 14 — Интерфейс модуля “Монитор”

10. Модуль “Тренд” отображает параметры изменения технического состояния диагностируемого агрегата по выбранным промежуткам времени, а также проводит анализ их изменения. Доступный выбор промежутков отображения изменения технического состояния агрегата составляет:

- Отображение параметров работы агрегата представленных в реальном времени:
- Отображение временного промежутка в 12 часов с шагом снятия параметров в 1,5 минуты.
- Отображение временного промежутка в 4 дня с шагом снятия параметров в 12 минут.
- Отображение временного промежутка в 40 дней с шагом снятия параметров в 20 минут.
- Отображение временного промежутка в 1 год с шагом снятия параметров в 1 день.
- Отображение временного промежутка в 9 лет с шагом снятия параметров в 7 дней.

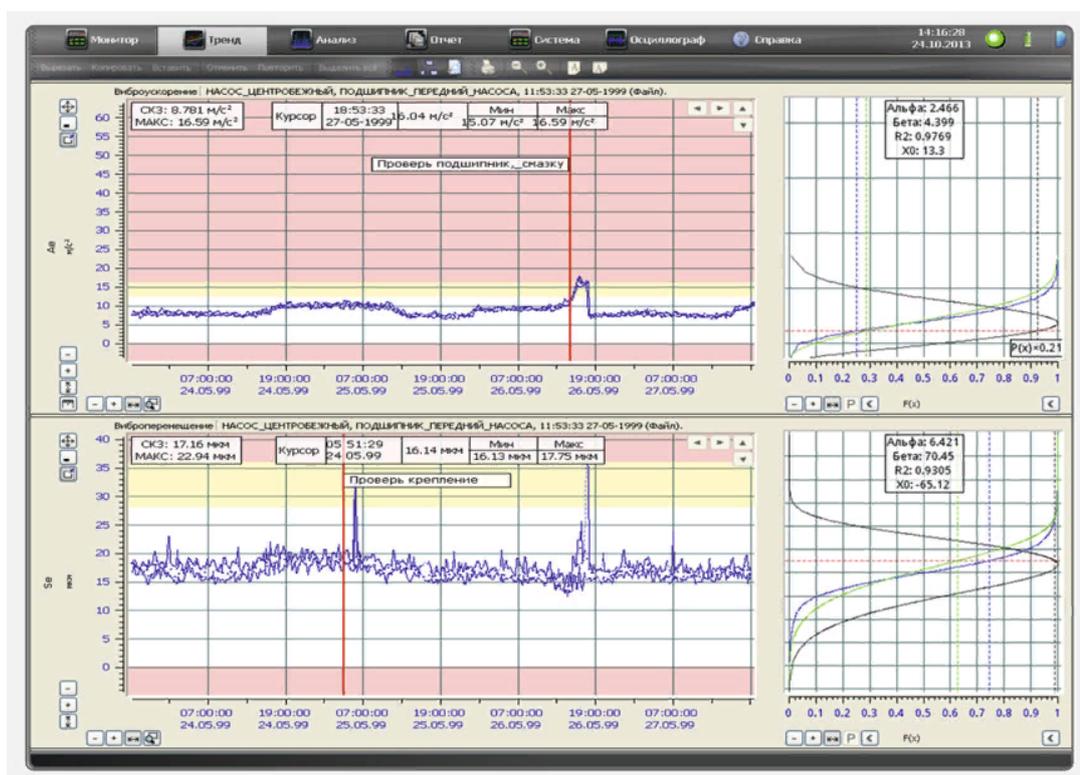


Рисунок 14 — Интерфейс модуля “Тренд”

11. «АНАЛИЗ» предназначен для анализа временных реализаций сигналов, спектров, кепстров и т.д. в целях определения состояния диагностируемого оборудования в реальном времени, что позволяет диагностам выявлять фундаментальные причины отказов, такие как ошибки эксплуатации, проектирования, монтажа. Возможна обработка многоканальных сигналов с различными частотами дискретизации до единиц МГц, точность определения частоты гармонических составляющих достигает 0.2 Гц, существуют опции «спектральной матрицы», в которых выполняется разбиение сигнала на периодические и шумовые компоненты.

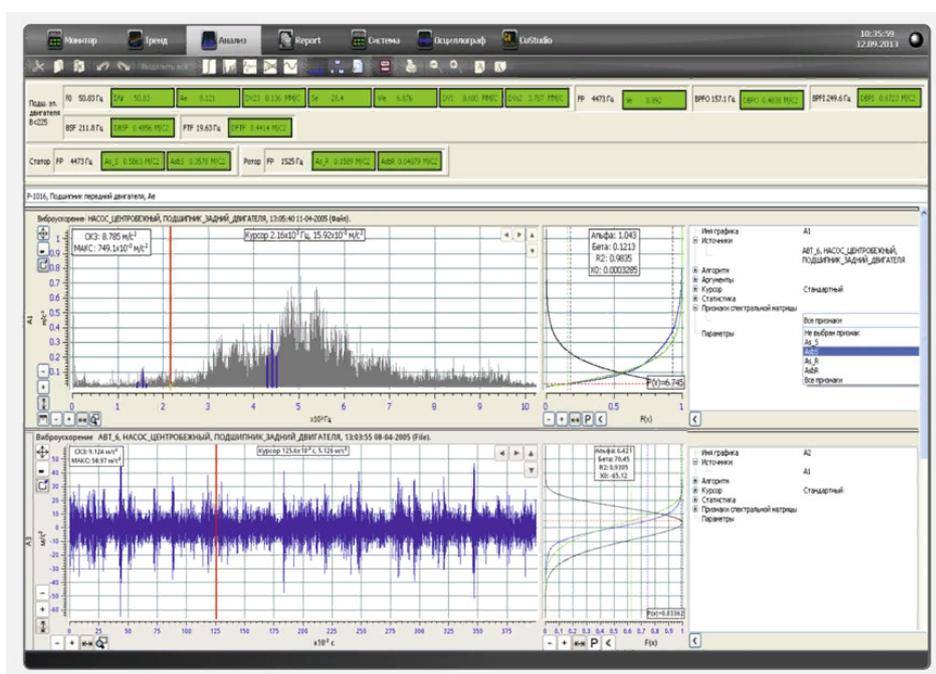


Рисунок 14 — Интерфейс модуля “Анализ”

12. Модуль “Система”, производит диагностику технического состояния и анализ работы измерительных приборов, программных интерфейсных модулей и кабельных линий связи, находящихся в составе системы вибродиагностики, а также формулирует предписания обслуживающему персоналу на проведение ремонтных работ по устранения выявленных недочетов в узлах системы диагностики.



Рисунок 14 — Интерфейс модуля “Система”

13. Модуль журнала обслуживающего персонала автоматизирует составление плана технического обслуживания и планирование предстоящего ремонта диагностируемых агрегатов или узлов диагностической системы по электрической или механической части. Ведет базу данных по описанию проводимых ремонтных работ на остановленных агрегатах.

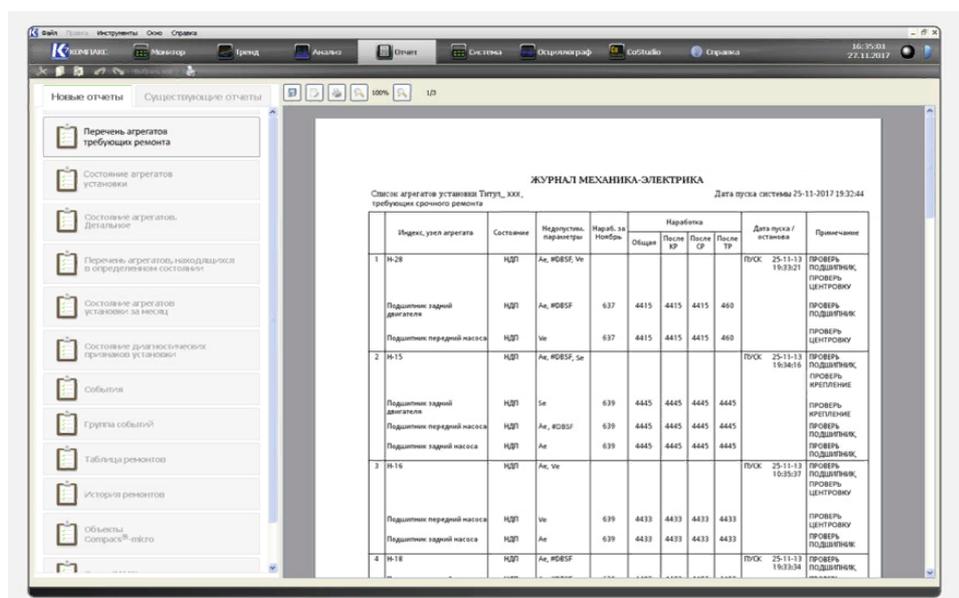


Рисунок 15 — Интерфейс модуля журнала обслуживающего персонала



Рисунок 16 — Структура модуля “Журнал обслуживающего персонала”

### 3.3.2 Работа экспертной системы на основе нейронной сети

Главным преимуществом экспертной системы, выполняющую высокую степень качества получаемых решений, является возможность анализа большого массива данных не по классическим математическим моделям, где строгость этих моделей является их ограничением, а с применением моделей нечеткой логики (совокупность нечетких функций принадлежности и правил), что позволяет в узкоспециализированных областях принимать решения на уровне специалиста. Главной особенностью таких систем является

1. результат работы, зависит в большей степени не на результативности использования определенных математических моделей, а на размере базы знаний.

2. решения, получаемые при использовании экспертной системе основаны на слабо сформулированных задачах и сопоставимы с субъективным решением специалиста.

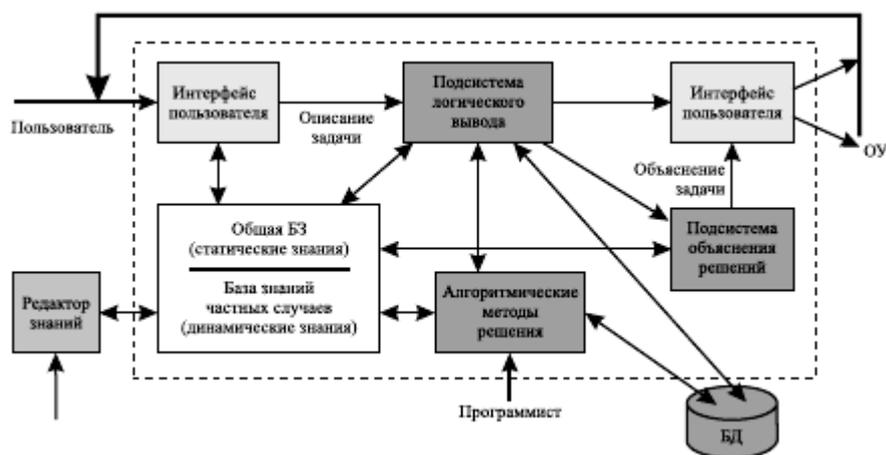


Рисунок 17 — Структура ЭС

Основной экспертной системы является подсистема нечеткого вывода, которая работает на основе информации заложенной в базу знаний, и решает поставленные перед ЭС задачи. Одновременная работа с базой знаний и базой данных обеспечивает установку сложного технического диагноза.

База знаний в системе формируется специалистами путем вывода свода нечетких правил, с присвоением каждому приоритета, позволяющее исключить противоречия между ними.

Пример базы знаний:

1. При получении *высокого* среднеквадратического значения виброускорения, или *высокого* пикового значения виброускорения, или *высокого* пикового значения огибающей виброускорения, или *высокого* средне квадратического значения огибающей виброускорения, или *высокого* отклонения качества детали, получаем *высокое* отклонение технического состояния оборудования от нормы.
2. При получении *среднего* значения среднеквадратического виброускорения и *среднего* отклонения качества детали, получаем *высокое* отклонение технического состояния оборудования от нормы.
3. При получении *среднего* значения пикового виброускорения и *среднего*

отклонения качества детали, получаем *высокое* отклонение технического состояния оборудования от нормы.

4. При получении *среднего* значения пиковой огибающей виброускорения и *среднего* значения отклонения качества детали, получаем *высокое* отклонение технического состояния оборудования от нормы.

5. При получении *среднего* значения среднеквадратической огибающей виброускорения и *среднего* значения отклонения качества детали оборудования, получаем *высокое* отклонение технического состояния оборудования от нормы.

6. При получении *высокого* значения отклонения качества детали, получаем *высокое* отклонение технического состояния оборудования от нормы.

7. При получении *не низкого* значения частота вращения и *среднее* значение пиковое виброускорения, получаем *среднее* отклонение технического состояния оборудования от нормы.

8. При получении *среднего* значения среднеквадратического виброускорения и *не низкого* значения частота вращения, получаем *среднее* отклонение технического состояния оборудования от нормы.

9. При получении *среднего* значения среднеквадратического виброускорения и *низкого* значения частота вращения и *низкого* значения пикового виброускорения и *низкого* значение пиковой огибающей виброускорения и *низкого* значения среднеквадратического огибающей виброускорения и *низкое* отклонение качества детали оборудования получаем *среднее* отклонение технического состояния оборудования от нормы.

10. При получении *низкого* среднеквадратического значения виброускорения и *низкой* значения частота вращения и *низкого* значения пикового виброускорения и *низкого* значения пиковой огибающей виброускорения и

*низкого* значения среднеквадратического огибающей виброускорения и *среднее* отклонение качества детали оборудования получаем *среднее* отклонение технического состояния оборудования от нормы.

11. При получении *низкого* значения среднеквадратического виброускорения и *низкого* значения частоты вращения и *среднего* значения пикового виброускорения и *низкого* значения пиковой огибающей виброускорения и *низкого* значения среднеквадратического огибающей виброускорения и *низкого* отклонение качества детали оборудования, получаем *среднее* отклонение технического состояния оборудования от нормы.

12. При получении *среднего* значения среднеквадратического виброускорения и *среднее* значение частота вращения и *низкое* значения пикового виброускорения и *низкого* значения пиковое огибающей виброускорения и *среднего* значения среднеквадратического огибающей виброускорения и *низкого* отклонения качества деталей оборудования, получаем *среднее* отклонение технического состояния оборудования от нормы.

13. При получении *низкого* значения среднеквадратического виброускорения и *низкой* значения частота вращения и *низкого* значения пикового виброускорения и *среднего* значение огибающей виброускорения и *низкого* значения среднеквадратического огибающей и *низкого* значения отклонение качества детали, получаем *среднее* отклонение технического состояния оборудования от нормы.

14. При получении *низкого* значения среднеквадратического виброускорения и *низкой* частоты вращения и *низкого* значения пиковое виброускорения и *низкого* значения пиковой огибающей виброускорения и *среднего* значения среднеквадратического огибающей виброускорения и *низкого* качества детали оборудования, получаем *среднее* отклонение технического состояния

оборудования от нормы.

15 При получении *низкого* значения среднеквадратического виброускорения и *низкой* частота вибрации и *низкого* значения пикового виброускорения и *среднего* значения пиковой огибающей виброускорения и *низкого* значения среднеквадратического огибающей виброускорения и *низкого* отклонение качества детали, получаем *низкое* отклонение технического состояния оборудования от нормы.

16. При получении *низкого* среднеквадратического виброускорения и *низкого* значения частоты вибрации и *низкого* значения пикового виброускорения и *низкого* значения пиковой огибающей виброускорения и *среднего* значения среднеквадратического виброускорения и *низкого* отклонения качества детали, получаем *низкое* отклонение технического состояния оборудования от нормы.

17. При получении *низкого* значения среднеквадратического виброускорения и *низкого* значения частоты вибрации и *низкого* значения пикового виброускорения и *низкого* значение пиковой огибающей виброускорения и *низкого* значения среднеквадратической огибающей виброускорения и *низкого* отклонения качества детали, получаем *низкое* отклонение технического состояния оборудования от нормы.

### **3.3.3 Создание обучающей выборки**

Для использования нейронной сети в целях вибродиагностики агрегата необходим алгоритм, обучающий нейронную сеть. Алгоритм обучения сети строится на основе входных и выходных векторов. Для написания в данной бакалаврской работе алгоритма, обучающий нейронную сеть, за основу входящих векторов (первой цепи нейронов алгоритма) взяты колебания

гармоник у диагностируемых дефектов с наиболее выраженной частотой вибрационного спектра. А выходные вектора (последняя цепь нейронов алгоритма) будут представлять из себя диагностируемые неисправности на выявление которых будет ориентирована сеть. Каждому выходному вектору присваивается порядковый номер и вид диагностируемой неисправности:

- выходной вектор № 1 небаланс вращающихся масс ротора.

Одним из самых распространённых дефектов оборудования является небаланс вращающихся масс ротора, которые приводят к резкому увеличению вибраций. Существует множество различных причин возникновения данного дефекта, следствиями которых могут являться как особенности конструкции, так и время эксплуатации. Небалансы разделяются на статические и динамические типы.

Самыми встречаемыми признаками наличия небалансов вращающихся масс роторов в различном оборудовании выделяют следующие:

1. временной сигнал вибрации достаточно прост и содержит достаточно малое количество гармоник и шумов в области дефектов. В данной вибросигнале преобладают вибрации с периодом, который соответствует оборотной частоте ротора;
2. амплитуда всех гармоник в спектре не менее чем в 2-5 раз меньше амплитуды гармоники оборотной частоты вращения вала;
3. отношение амплитуды первой гармоники вертикального направления к гармонике поперечного направления равно 0,7-1,2;
4. первая вертикальная гармоника равна либо чуть меньше первой поперечной гармоники.

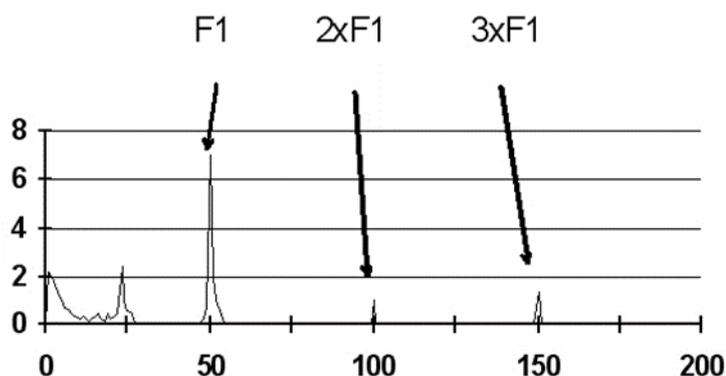


Рисунок 18 — характерный спектр вибрации ротора с небалансом  
- выходной вектор № 2 расцентровка соединенных валов соседних роторов.

Центровка – это взаимное положение центров валов соседних роторов. При идеальном совпадении осей двух валов утверждают, что центровка выполнена качественно, при отсутствии совпадения осевых линий – не качественно, то есть произошла расцентровка двух валов. Существует два вида расцентровки: параллельная и угловая. Рассмотрим каждую подробнее

Параллельная расцентровка - является расцентровкой, при которой произведено взаимное параллельное смещение осей.

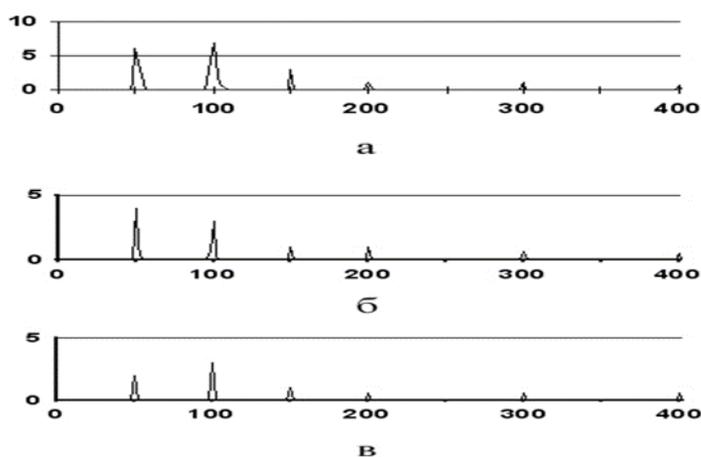


Рисунок 19 — характерный спектр вибрации агрегата с параллельной расцентровкой: а – вертикальная составляющая, б - горизонтальная составляющая, в — осевая составляющая

Угловая рацентровка – это невзаимное расположение осей валов под некоторым углом.

В практике чаще встречается комбинированные расцентровки, включающие в себе приведенные выше типы одновременно. В результате анализа механической системы дается диагноз и рекомендации по устранению данной неполадки.

Основным показателем наличия расцентровки в валах является присутствие трех гармоник оборотной частоты.

- выходной вектор № 3 затирание в процессе прямого контактирования соседних узлов.

Задевания и затирания элементов оборудования друг о друга имеют место быть в процессе ее работы с заядлой частотой. Задевание – процесс механического контакта частей ротора с элементами агрегата.

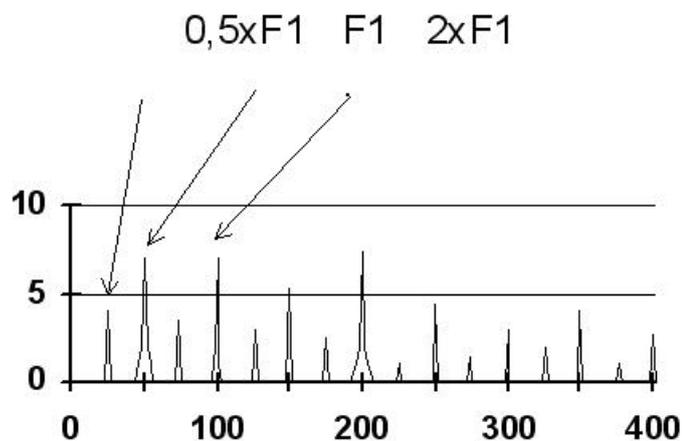


Рисунок 20 – характерный спектр вибрации агрегата с задеванием

В случае появления в агрегате задеваний или затираний происходит деформация и модификация спектра вибросигнала. Так в сигнале начинают присутствовать сигналы с синхронными компонентами, так как задевание или затирание часто синхронизируется с частотой вращения ротора.

Затирания или задевания по мощности составляют 60-80% от мощности всего вибросигнала, а остальные 20-40% несут в себе несинхронные компоненты. Это компоненты, или гармоники, происходят по

двум причинам: во-первых, нестационарность процесса задевания, во-вторых, резонансные процессы в конструкции.

Процесс задевания является возбуждающим колебания процессом, что вызывает на спектре появление «зубчатых холмов». Центры данного «холма» соответствуют частоте резонанса всей конструкции.

Так как разные элементы конструкции имеют разные резонансные частоты, в спектре вибросигнала поднятия могут появляться на нескольких частотных диапазонах.

Основной особенностью спектра вибросигнала при резонансных задеваниях и затираниях является тот факт, что все несинхронные компоненты данного спектра сосредотачиваются вблизи синхронных. На спектре это выражается в уширении основания некоторых синхронных гармоник.

Очень часто затиранием в картине колебаний возбуждаются целые семейства гармоник, начиная от  $1/2$  заканчивая до  $1/5$ .

- выходной вектор № 4 дефект подшипника скольжения.

Описанный выше дефект возникает при потере устойчивости всего узла, при котором он переходит в режим автоколебаний. Данные колебания наводят специфическую и низкочастотную вибрацию в вертикальном и в поперечном направлениях.

Частота этого автоколебания одинакова у всех роторов и составляет около 41-47% от оборотной частоты ротора – масляная частота. Значение частоты таких вибраций в подшипнике может меняться в определенном диапазоне.

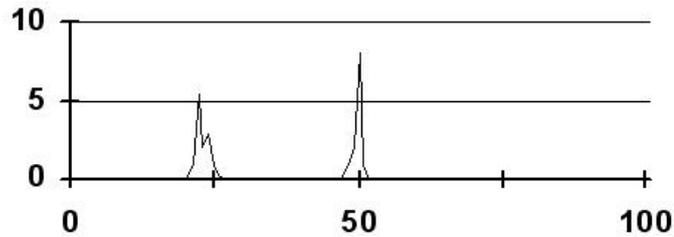


Рисунок 21 – характерный спектр вибраций подшипника скольжения с масляной гармоникой

- выходной вектор № 5 дефект подшипника качения.

Данный вид дефектов характеризуется фоновой и импульсной вибрацией, которые представляют из себя выделяющиеся по амплитуде импульсы, который повторяются через равные интервалы, что можно наблюдать на рисунке 22.

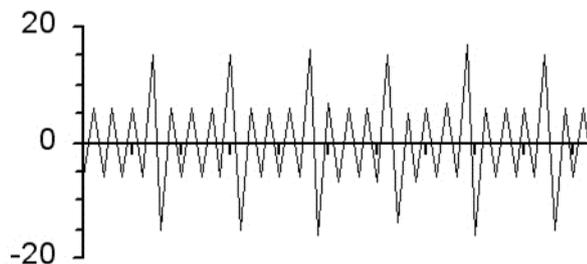


Рисунок 22 – выделяемые по амплитуде импульсы

В момент прохождения через дефектную зону подшипника на спектре появляется четко выраженный пик. Параметры данного пика являются амплитуда и частота повторения, а также амплитуда импульса.

При диагностике состояния подшипника качения уделяют внимание двум случаям:

- значение количества общего уровня фона вибрации;
- отношение уровня фона вибрации к амплитуде пиковых значений.
- выходной вектор № 6 дефект зубчатой пары редуктора.

Работу любой зубчатой пары в редукторе или мультипликаторе сопровождает целый ряд характерных вибраций, вызываемых трением и ударами при обкатывании зуба одной шестерни зубом другой шестерни. Анализ этих вибраций позволяет в работающем оборудовании достаточно успешно диагностировать целый ряд различных дефектов зубозацепления.

При проведении регистрации вибросигналов, генерируемых зубчатыми парами необходимо учитывать основные характерные особенности их работы, такие как:

- Вибросигналы от зубчатых пар содержат в себе как синхронные компоненты (гармоники), так и несинхронные. Вся основная мощность в вибросигнале от зубчатой пары сосредоточена в достаточно высокочастотной области.

- Гармоники, свойственные зубозацеплению, имеют невысокий энергетический уровень.

Вибрации от зубозацепления являются нестационарными. На спектре вибросигнала белый шум проявляется в виде поднятия общего уровня всего спектра в достаточно широкой полосе частот вблизи характерной частоты зубозацепления.

Обучение сети происходит поочередной подачей диагностируемой информации на каждый из входных векторов, после получения диагноза о техническом состоянии агрегата, после чего параметры сети корректируются под реально соответствующий диагноз агрегата.

После чего мы получаем матрицу входных векторов вида  $\{x_1, x_2 \dots x_n\}$  где n количество первой цепи нейронов алгоритма.

$X_1$  0, 0, 0, 0, 0, 0, 4, 1, 3, 2.79, 0, 0, 0, 0, 5, 5, 7, 0, 0, 0.2

$X_2$  7, 0, 0, 6, 4, 2, 7.5, 6, 12, 8, 5.01, 0, 0, 0, 3, 3, 6, 0.5, 1, 0.75

$X_3$  0, 12, 0, 0, 0, 0, 3.5, 2, 3, 0, 0, 2.68, 0, 0, 0, 0, 6, 0, 0.75, 0.8

$X_4$  1, 1, 8, 7.5, 2.5, 3.5, 7.5, 6.5, 8, 0, 10, 0, 0, 5, 0, 1.5, 3, 0, 1, 1.5

$X_5$  2, 8, 1, 3, 1, 1, 5, 3.5, 4, 0, 0, 5, 3.68, 0, 4.5, 4, 2, 0, 0.5, 1  
 $X_6$  1.5, 0, 5, 1.5, 1, 0.75, 7.5, 5, 6, 0, 0, 0, 0, 8, 0, 2, 4, 0, 0, 2  
 $X_7$  0, 2, 0, 1, 0.5, 0.25, 4.5, 3, 3.5, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 5, 1, 0, 1.5  
 $X_8$  0, 5, 2, 1, 0.5, 0.25, 3, 2, 3, 0, 0, 0, 7, 0, 0, 0.75, 4, 0.5, 0, 1  
 $X_9$  0, 1, 0, 0, 0, 0, 4, 4, 5, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 3, 0, 1, 1  
 $X_{10}$  0, 0, 0, 0, 0, 0, 3, 1.5, 2, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 3, 2, 0, 2, 2.3  
 $X_{11}$  0, 0, 0, 0, 0, 0, 1.5, 2, 3, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 4.5, 1, 0, 0, 1.5  
 $X_{12}$  0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0.5, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 2, 2, 1, 0, 2  
 $X_{13}$  0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1.5, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1.5, 0, 0, 1  
 $X_{14}$  0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0.5, 0, 1, 3  
 $X_{15}$  0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 2, 2  
 $X_{16}$  0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 5, 4  
 $X_{17}$  0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 3, 9  
 $X_{18}$  0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 6, 13  
 $X_{19}$  0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 7, 10  
 $X_{20}$  0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 6, 12

И матрицу выходных векторов вида  $D\{d_1, d_2 \dots d_m\}$ , где  $m$  количество нейронов в последней цепи алгоритма.

$d_1$  1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0  
 $d_2$  0, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0  
 $d_3$  0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0  
 $d_4$  0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0  
 $d_5$  0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 0  
 $d_6$  0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1

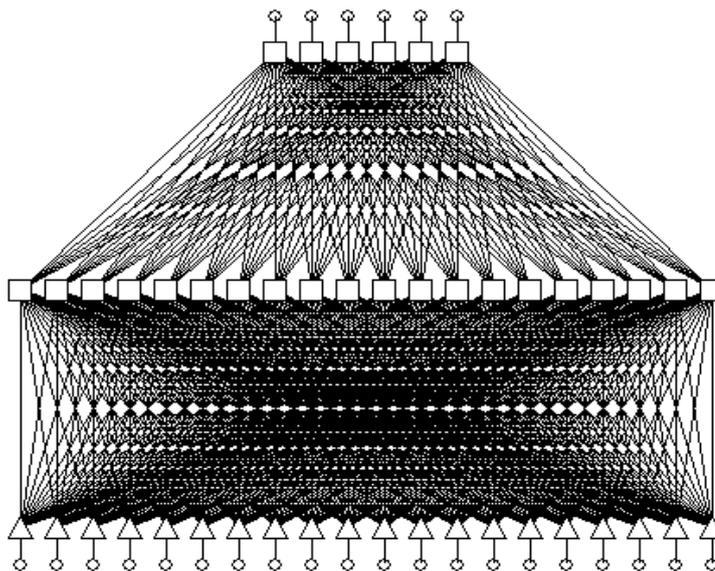


Рисунок 23 – Структура нейронной сети

Результат обучения нейронной сети можно увидеть на рисунке 23, где видно сведение к минимуму зависимости получаемых выводов, от ошибок уже через 800 эпох, что свидетельствует о том, что сеть обучилась корректно ставить технические диагнозы по выбранным гармоникам спектра.

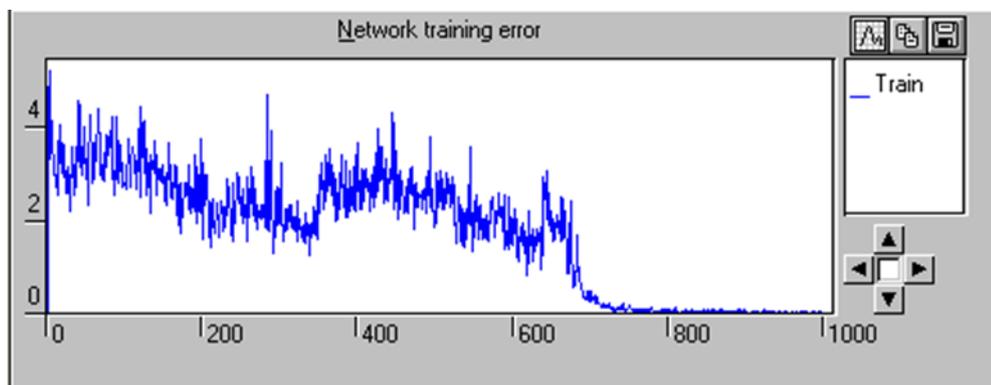


Рисунок 23 – Результат обучения нейронной сети

#### **4 Методика нормирования вибрации и распознавания технического состояния оборудования**

При использовании метода диагностики технического состояния оборудования по уровню вибрации используются выработанные со временем нормативные стандарты, параметрами выработки которых служат показатели мощности агрегата, присущей частоты вращения ротора, для выбранного типа, диагностируемого агрегата, высота на которой происходит вращение ротора агрегата и т.д. установленные стандарты ложатся в основу руководящих документов, которые тем не менее носят рекомендательный характер. Однако зачастую даже для типовых установок на одном производстве, эксплуатирующих одинаковый парк машин, используют различные параметры для определения технического состояния диагностируемых агрегатов. Происходит это из-за того, что даже на новых однотипных агрегатах при снятии вибродиагностических признаков может наблюдаться значительное различие в полученной информации, а каждый отдельный агрегат имеет несколько отличные параметры вибрации в сравнении с агрегатами, имеющими однотипную конструкцию. Для корректного контроля состояния диагностируемых агрегатов производится установление собственных критериев оценки состояния для каждого парка машин.

Для определения допустимых значений вибрации проводится снятие значений вибрации у диагностируемых агрегатов, из полученных данных исключаются результаты вызывающие сомнения. После, на основе полученных данных в автоматизированном режиме производится расчет предварительных допустимых диагностических параметров. При автоматизированном расчете допустимых значений исключается возможность ошибки в расчетах, допускается возможность корректировки данных и выводится итоговый результат.

Данные снятые с диагностируемых агрегатов, для расчета допустимых значений показаны в таблице 1.

Таблица 1 – исходные данные

Агрегаты	Параметры			
	СКЗ	Пар.1	Пар.2	Пар.3
1	3.742	0.738	2.691	2.443
2	4.812	0.515	2.716	1.383
3	6.263	0.419	4.837*	0.085
4	2.422	0.899	1.786	1.067
5	4.49	1.525*	1.432	1.017
6	2.827	0.15	1.873	0.881
7	2.51	0.245	1.935	0.58
8	4.525	0.276	0.251	0.924
Среднее арифм. (хср)	3.719	0.477	2.186	0.752
Дисперсия (s)	1.112	0.331	0.779	0.381

Полученные предварительные значения распознавания технического состояния оборудования по данным вибрации представлены в таблице 2.

Таблица 2 – полученные результаты

Верхняя гр. ( $x_{\max}, t\beta = 1,5$ )	5.387	0.744	2.71	1,323
Верхняя гр. ( $x_{\max}, t\beta = 2$ )	5,943	0.853	2.936	1,514
Верхняя гр. ( $x_{\max}, t\beta = 3$ )	7.056	1.074	3.391	1.898
хСР 4 Дб:	5.895	0.658	3.217	1.193
хСР 8 Дб:	9.336	1.043	5.095	1.889

При расчете из исходных данных были исключены значения вызывающие сомнения, так как они превышают уровень среднеарифметическое плюс имеют утроенную дисперсию.

Результатом расчета является определение 5 и 15 % совокупность всех диагностируемых данных отражающих наивысший уровень вибрации агрегатов. Что обеспечивает получение допустимых значений вибрации агрегата и возможность классификации диагностируемого парка машин по уровню вибрации на группы агрегатов:

1. в нормальном техническом состоянии (не достигших 85% -ной границы совокупности данных).
2. неудовлетворительном техническом состоянии, требующих принятие мер по ремонту (достигших 85% -ной границы совокупности данных).
3. недопустимых к эксплуатации (достигших 95% -ной границы совокупности данных).

## **Заключение**

Путем проведения анализа установки каталитического риформинга ЛГ-35/11-300, была разработана структура системы вибродиагностики и описаны все отдельные её элементы.

С помощью написания базы знаний, представляющих свод нечетких логических правил с присвоенными приоритетами, был разработан алгоритм обучения искусственной нейронной сети, который на примере показал способность корректно диагностировать техническое состояние электрических роторных двигателей и ставить технически правильный диагноз, анализируя параметры вибрации.

Для развертывания системы вибромониторинга на установку ЛГ-35/11-300 СНПЗ, был произведен индивидуальный расчет предельных значения при распознавании состояния диагностируемого оборудования для всего обслуживаемого парка машин.

Получение допустимых значений вибрации агрегата дало возможность выделить наивысший уровень вибрации у 5 и 15 % агрегатов, путем анализа совокупность всех диагностируемых данных, что обеспечило возможность классификации диагностируемого парка машин по уровню вибрации на группы агрегатов удовлетворительного, неудовлетворительного и аварийного состояния.

## Список используемых источников

1. Барков А.В. Вибрационная диагностика колесноредукторных блоков на железнодорожном транспорте – СПб.,2002. – 168 с.
2. Биргер И.А. Техническая диагностика 1978.–М: Машиностроение,1978. – 59 с.
3. Блок В.М. Пособие к курсовому и дипломному проектированию для электроэнергетических специальностей – СПб.,1981,. – 383 с.
4. Виброанализатор СД–12М Методика поверки. – СПб., 2000. – 73 с.
5. Герасимов В.Г. Электротехнический справочник: в 3 т. Энергоиздат. – Т.3., 1982. – 520 с.
6. Гиберт А.И. Логические устройства для технической диагностики. – Научные труды Сиб. ВИМ., 1964. – 136–156 с.
7. Грундспенькис Я.А. Топологическая модель функционирования двигателя внутреннего сгорания автомобиля.–В кн.: Кибернетика и диагностика. Рига. Зинатне, вып5., 2006. – 45–53 с.
8. Жаркова И.В. Экономика отрасли – СПб., 2005. – 41 с.
9. Зюзин А.Ф. Монтаж, эксплуатация и ремонт электрооборудования промышленных предприятий и установок. – 2-е изд., доп. и перераб. – М.: Высшая школа, 1980. – 416 с.
10. Коновалова Л.Л. Электроснабжение промышленных предприятий и установок. Учебное пособие для СУЗов М.: Энергоатомиздат, 1989. – 526 с.
11. Конюхова Е.А. Электроснабжение объектов– М.: Мастерство, 2001. – 313 с.

12. Мукасева Н.Е. Электроснабжение промышленных предприятий. Учебное пособие для ВУЗов / Н. Е. Мукасева. – М.: Энергоатомиздат, 1978. – 485 с.
13. Павлов Б.В. Акустическая диагностика машин.–М.: Машиностроение., 1971. – 222 с.
14. Попков В.И. Виброакустическая диагностика и снижение виброактивности судовых механизмов. –Л. Судостроение., 1974. – 218 с.
15. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей.–СПб., 2003. – 187 с.
16. Руководство по эксплуатации диагностического комплекса «ВЕКТОР – 2000». – СПб., 2000.
17. Сибикин Ю.Д. Электроснабжение промышленных предприятий и установок. – СПб., 2001. – 346 с.
18. Федоров А.А. Учебное пособие для курсового и дипломного проектирования. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 368 с.
19. Ширман А.Р. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования.–Москва., 1996. – 141–143 с.
20. Кацман, М. М. Электрические машины. – М., Высшая школа, 2004. – 464 с.
21. Microcontroller based PWM Inverter for Speed Control of a Three Phase Induction Motor. [Электронный ресурс] :Móslém SAMI, Mohammad Javad SHIEKHDAVOODI, Morteza ALMASSI- URL : <http://doaj.org>.
22. DEVELOPMENT DRIVE KINETIC ENERGY OF THE FLYWHEEL TYPE MAGNETIC AXES. [Электронный ресурс] : Magnus Hedlund, Johan Lundin, Juan de Santiago, - URL : <http://doaj.org>. / 2015;8(10):10636-10663 DOI 10.3390/en81010636.

23. "Wireless Design for Power Theft Monitoring," [Электронный ресурс] IEEE 2010 Fourth International Conference on Sensor Technologies and Applications.
24. Sandra Mattsson, Asa AB Fasth, Fast-Berglund, Johan Stahre. Describing Human-Automation Interaction in Production [Text] / Sandra M. // Conference Paper, 2012. – PP. 2-3.
25. Servo signal processing for flying height control in hard disk drives, 2011, Uwe Boettcher, Christopher A. Lacey, Hui Li, Kensuke Amemiya, Raymond A. de Callafon, Frank E. Talke.